

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS DE PAULA SOARES

MODELAGEM NUMÉRICA DO TRANSPORTE DE AREIA NO ARCO PRAIAL  
MATINHOS-PONTAL

PONTAL DO PARANÁ

2016

LUCAS DE PAULA SOARES

MODELAGEM NUMÉRICA DO TRANSPORTE DE AREIA NO ARCO PRAIAL  
MATINHOS-PONTAL

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia, no Curso de Oceanografia do Centro de Estudos do Mar, Campus Pontal do Paraná, vinculado à Reitoria da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg

PONTAL DO PARANÁ

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE:  
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar  
Fernanda Pigozzi – CRB 9/1151

S11m Soares, Lucas de Paula  
Modelagem numérica do transporte de areia no arco praiial Matinhos - Pontal. / Lucas de Paula Soares. – Pontal do Paraná, 2016.  
52 f.: il., 29 cm.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg.

Monografia (Graduação) – Curso de Oceanografia, Centro de Estudos do Mar, Setor Reitoria, Universidade Federal do Paraná.

1. Transporte de sedimentos. 2. Modelagem numérica. 3. Dinâmica costeira. Título. II. Noernberg, Maurício Almeida. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551

## **TERMO DE APROVAÇÃO**


Lucas de Paula Soares

**“Modelagem numérica do transporte de areia no arco praial  
Matinhos-Pontal.”**

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de  
Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela  
Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. Carlos Roberto Soares - CEM/UFPR



MSc. Alexandre Pereira Cabral - CEM



Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg  
Presidente

Pontal do Paraná, 23 de dezembro de 2016

## RESUMO

O arco praial Matinhos-Pontal do Sul está localizado no litoral do estado do Paraná, delimitado a norte pela desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá e a sul pelo pontal rochoso denominado Pedra de Matinhos. A região é formada por praias predominantemente arenosas, sem a ocorrência frequente de pontais rochosos. O presente estudo tem como objetivo analisar o transporte de sedimentos da classe areia utilizando a modelagem numérica, para os anos de 2006, 2007 e 2008, considerando dados pré-existentes do balanço sedimentar. A modelagem numérica foi realizada a partir da ferramenta SMC-Brasil, utilizando os dados do clima de ondas obtidos a partir da reanálise global e do *downscaling*, presentes no banco de dados do SMC-Brasil. Foram propagadas ondas de águas profundas até à costa a partir de um ponto selecionado e posteriormente feita a reconstrução das séries temporais para o cálculo do transporte de sedimentos. Os resultados obtidos a partir da modelagem indicaram maior suscetibilidade dos perfis Atami, Marisol, San Marino e Matinhos aos processos sedimentares predominantemente erosivos, e o perfil Santa Terezinha com tendência aos processos sedimentares predominantemente acrescivos para o período estudado.

Palavras-chave: Dinâmica costeira. Transporte de sedimentos. Modelagem numérica. SMC-Brasil.

## **ABSTRACT**

The Matinhos-Pontal do Sul beach-arc is located on the coast of the state of Paraná, delimited to the north by south mouth of the Estuarine Complex of Paranaguá and south by the rocky point called Pedra de Matinhos. The region is formed by predominantly sandy beaches, without the frequent occurrence of rocky points. The present study aims to analyze sediment transport of the sand class using numerical modeling for the years 2006, 2007 and 2008, considering pre-existing sedimentary balance data. Numerical modeling was performed using the SMC-Brazil tool, using the wave climate data obtained from the global reanalysis and downscaling, present in the SMC-Brazil database. Deep water waves were propagated to the coast from a selected point and later the reconstruction of the time series for sediment transport calculation. The results obtained from the modeling indicated a higher susceptibility of the Atami, Marisol, San Marino and Matinhos profiles to the predominantly erosive sedimentary processes, and the Santa Terezinha profile with a tendency to sedimentary processes predominantly added to the studied period.

**Keywords:** Coastal dynamics. Sediment transport. Numerical modeling. SMC-Brazil.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 OBJETIVO .....	9
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
<b>2 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>10</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
3.1 SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA .....	13
3.1.1 SMC Tools.....	14
3.1.2 SMC 3.0.....	14
3.1.3 Mopla.....	16
3.2 BASE DE DADOS SMC-BRASIL.....	23
3.2.1 Reanálise global (GOW) .....	23
3.2.2 Transferência de dinâmicas em águas intermediárias (DOW) .....	24
3.2.3 Base de dados de nível.....	27
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1 DADOS DO CLIMA DE ONDAS.....	29
4.2 EXECUÇÃO DOS MODELOS .....	29
4.2.1 Propagação de ondas .....	29
4.3 Análise de longo prazo em praias .....	36
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
5.1 DADOS DO CLIMA DE ONDAS.....	37
5.2 ANÁLISE DE LONGO PRAZO EM PRAIAS .....	38
5.2.1 Atami .....	39
5.2.2 Marisol.....	39
5.2.3 Santa Terezinha .....	39
5.2.4 San Marino .....	39
5.2.5 Matinhos .....	40
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>44</b>
<b>APÊNDICE 1 - VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA SEDIMENTAR DOS PERFIS ..</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE 2 - VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS PERFIS SIMULADOS .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos relacionados à morfodinâmica do ambiente costeiro apresentam grande complexidade em decorrência da instabilidade deste sistema, que apresenta influência de diversas forças naturais atuando em escalas distintas no espaço e no tempo (Sprovieri *et al*, 2010). O sistema costeiro é regido pelo balanço hidrodinâmico e morfológico, o qual é controlado pelo processo de transporte sedimentar. Mudanças nas condições morfológicas são capazes de afetar a hidrodinâmica do local, ocasionando uma readaptação do sistema (COWELL; THOM, 1994), onde ocorre a interação direta do transporte sedimentar com o movimento do fluido sobre uma superfície não consolidada, resultando no movimento da coluna d'água e posterior transporte das partículas sedimentares.

Mesmo com os avanços nos estudos relacionados a esta problemática, incertezas consideráveis são encontradas, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos, tanto na parte da dinâmica de sedimentos e seus padrões complexos como também na parte da hidrodinâmica (STRAUCH, 2001; FONTOURA, 2004).

A zona costeira constitui uma área de grande interesse para o homem, por oferecer condições favoráveis a diversos usos, como a pesca, a agricultura, atividades portuárias e de transporte, atividades de lazer, entre outros. Além do elevado valor socioeconômico apresenta importante valor ambiental devido à riqueza e diversidade de seus habitats, muitos dos quais atuam como proteção natural de regiões interiores a inundações (Fortunato *et al.*, 2008). Ainda segundo Fortunato *et al.* (2008), a intensa ocupação e pressão antrópicas aumentam a vulnerabilidade da zona costeira à ação de fatores naturais (tempestades, subida do nível médio do mar) e, da mesma forma, à própria ação do homem (redução de fontes sedimentares, dragagens, destruição de sistemas dunares, introdução de fontes de poluição), potencializando fenômenos com graves riscos associados, como a erosão costeira. Os ciclos naturais de erosão e acreção das praias exercem influência na implementação de obras costeiras. As fases erosivas desses ciclos são caracterizadas pela retirada de areia da praia pela ação do mar, colocando em risco ou destruindo obras costeiras muito próximas à sua área de influência.

A praia é um depósito transitório de material inconsolidado e de granulometria variável, suscetível às mudanças devido à ação das ondas e correntes litorâneas, sendo estas sazonais, anuais ou de vários anos (ANGULO, 2000). O transporte sedimentar influencia diretamente a durabilidade, os custos e a qualidade de obras costeiras



(FONTOURA, 2004). As taxas de transporte sedimentar que atuam na zona de surfe são muito superiores comparadas a outras áreas, devido à influência dos processos de quebra de ondas neste local, que dissipam a energia contida nas ondas, remobilizando e ressuspensando uma grande massa de sedimentos (Sprovieri *et al* 2010). De acordo com Sprovieri *et al.* (2010), aliada a este processo, a incidência oblíqua das ondas perpendiculares à linha de costa gera uma corrente, denominada corrente longitudinal, caracterizada pela alta capacidade de transportar sedimentos na zona de surfe. Devido aos intensos processos atuantes, a zona de surfe apresenta alta complexidade para levantamento de dados de campo, devido aos intensos processos hidrodinâmicos, comprometendo estudos morfológicos que abordem uma escala temporal.

Uma alternativa que apresenta grande potencial para o entendimento do ambiente costeiro é a modelagem numérica, ferramenta que permite explicar numericamente o comportamento ou característica de determinado sistema (Sprovieri *et al* 2010). O processo de modelagem pode ser definido como uma construção teórica, que busca descrever e explicar o funcionamento de um determinado sistema através da representação de um fenômeno ou conjunto de fenômenos do mundo real, e eventualmente, fazer a previsão de novos fenômenos, com base nas leis das diversas áreas da ciência (CHRISTOFOLETTI, 2004), desde que os dados ambientais utilizados sejam de qualidade e que os processos/resultados obtidos pela modelagem possam ser confrontados/comparados aos dados medidos *in situ* (Sprovieri *et al.*, 2010).

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo é caracterizar o transporte de areia no arco praial entre os municípios de Matinhos e Pontal do Paraná, no estado do Paraná, por meio de modelagem numérica, comparando os resultados obtidos com dados previamente coletados em campo.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

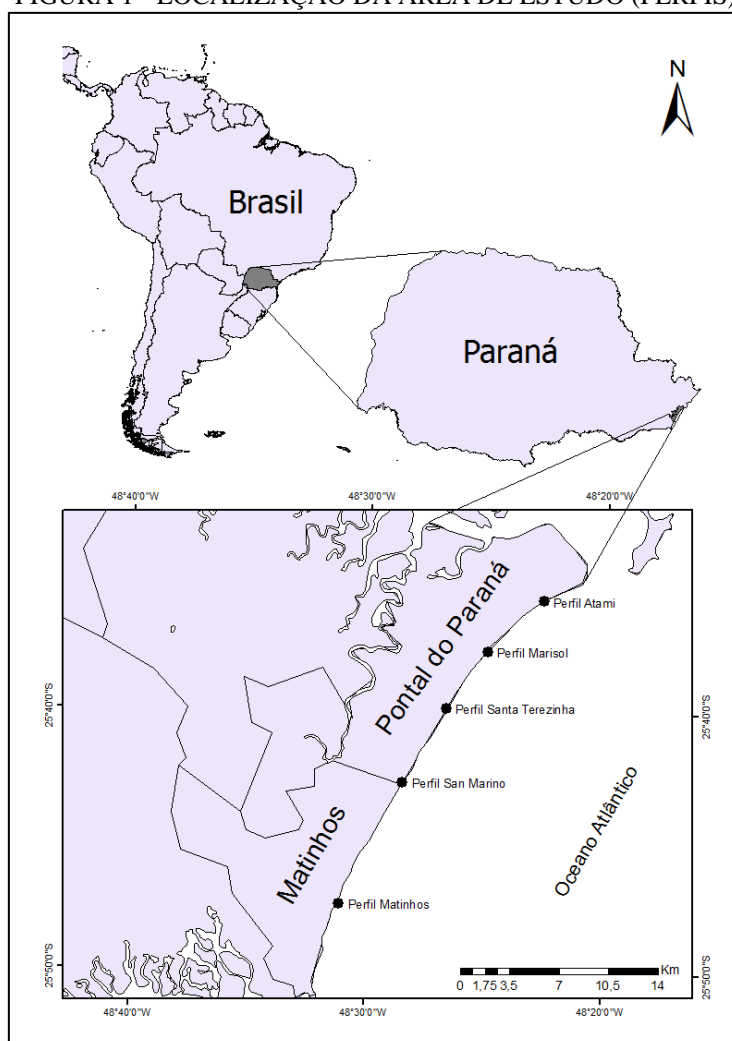
Identificar possíveis processos erosivos e deposicionais no arco praial Matinhos-Pontal do Paraná utilizando modelagem numérica.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

O litoral do Paraná é caracterizado por praias oceânicas, constituídas por areias finas a médias, com elevado grau de seleção, principalmente de quartzo e com teores variáveis de fragmentos carbonáticos biodetríticos e minerais pesados (ANGULO; ARAÚJO, 1996). As praias que formam o arco praial Pedra de Matinhos (25° 49'S e 48° 31'W) – Pontal do Sul (25° 34'S e 48° 20'W) são classificadas de intermediárias a dissipativas, com face praial larga e declividade entre 2° e 3°, geralmente com bermas e barras (ANGULO, 2000).

O arco praial entre o município de Pontal do Paraná e Matinhos (FIGURA 1), apresenta orientação nordeste-sudeste, com comprimento em torno de 34,5 quilômetros, se estendendo desde a desembocadura sul da baía de Paranaguá até a Ponta de Matinhos (Angulo *et al.*, 2016).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (PERFIS)



FONTE: Adaptado de QUADROS (no prelo, 2016).

Na porção norte do arco praial existe a influência direta da desembocadura sul da Baía de Paranaguá e delta de maré associado. Apenas ao sul do balneário Atami as praias, de extensão em torno de 29 quilômetros, podem ser consideradas sem influência direta da desembocadura (ANGULO; ARAÚJO, 1996). A partir de comparações de fotografias aéreas de 1952 e 1980, na parte oceânica da praia, Angulo (1993) não verificou variações da linha de costa superiores a 10 metros. Neste mesmo local Soares *et al.*, (1996) realizou um estudo do morfodinamismo praial, encontrando estágios intermediários na primavera e no verão, com predomínio de processos construtivos e formação de bancos na zona de surfe; e estágios dissipativos no outono e no inverno, quando predominaram períodos erosivos e os bancos submersos foram destruídos. Tal comportamento provavelmente predomina nas praias oceânicas do litoral paranaense, com características morfodinâmicas e sedimentares similares. Quadros (2002), através de perfis praias até a zona de arrebentação, verificou a ocorrência de erosão na parte subaérea da praia e acreção na parte submersa após eventos de alta energia, com balanço positivo considerando-se todo o perfil.

Na porção sul do arco praial, Bessa Junior (2003) identificou a progradação de 0,5 m/ano na praia Central de Matinhos e retrogradação de 0,7 m/ano entre os balneários Flamingo e Riviera, entre os anos de 1954 e 1980. Nos anos 1990, a construção de uma avenida beira-mar causou interferência na dinâmica costeira, ocasionando problemas erosivos, mais intensos nos balneários Flamingo e Riviera. A praia Central de Matinhos também sofre com processos erosivos decorrentes da ocupação inadequada, muito próxima à linha de costa, que têm provocado déficit de areia no sistema praial (Angulo *et al.*, 2006).

Na costa paranaense as marés são mistas semidiurnas com desigualdades diurnas e interações de cooscilações não lineares (MANTOVANELLI, 1999). Os sistemas de propagação de ondas no litoral sul estão associados aos seus centros de geração em regiões oceânicas distantes, independente das direções dos ventos locais. Os sistemas mais importantes para a geração de eventos de onda de alta energia são os ciclones subtropicais e as passagens de frentes frias atmosféricas. Os eventos de grande energia e com capacidade de transformação da costa estão relacionados a intensificação de forçantes como os ventos de sul-sudeste, o aumento do nível do mar e as ondas, os quais também intensificam as correntes costeiras.

No litoral do estado do Paraná as maiores ondulações (*swell*) ocorrem no outono, período no qual as ondas de vento (*sea*) perfazem 63% do tempo. A frequência das

ondulações com período de pico médio da onda igual ou superior a 10 segundos é de 36% (NEMES, 2011). Medições realizadas entre julho de 2009 a junho de 2010 indicam quatro direções de propagação das ondas predominantes: sul-sudeste (28%), sudeste (25%), sul (21%) e leste-sudeste (16%). Segundo Nemes (2011), na profundidade de 18 metros a altura significativa de ondas média é de 1,6 metros, com máximo de 4,8 metros e período de pico médio de onda de 8,4 segundos, com máximo de 17,8 segundos. A simultaneidade destes fatores potencializa os processos de erosão costeira.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA

A modelagem numérica dos processos de transporte de sedimentos atuantes no arco praial de Matinhos-Pontal do Sul utilizará o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), ferramenta computacional que combina metodologias de trabalho, base de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira. Criado inicialmente pelo Instituto Hidráulico Ambiental de Cantábria (IH Cantábria) da Universidade de Cantábria, com apoio da Diretoria Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente da Espanha, o sistema foi adaptado e transferido para a administração pública brasileira através do projeto “Transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão do litoral brasileiro”, desenvolvido com a colaboração internacional de diversas entidades: Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA), Secretaria do Patrimônio da União (SPU), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria.

As ferramentas do SMC-Brasil podem ser divididas em dois grupos:

- (1) SMC Tools, é uma ferramenta que reúne uma série de bancos de dados da costa brasileira (cartas náuticas e batimetria - BACO, ondas - DOW, maré astronômica – GOT e maré meteorológica GOS), inclusos no módulo IH-DATA. Há, ainda, um segundo módulo denominado IH-AMEVA, ferramenta de análise estatística de variáveis ambientais que permite processar as séries temporais de dinâmicas incluídas no IH-DATA. Finalmente, um terceiro módulo denominado IH-DYNAMICS, permite realizar a transferência de ondas até a costa, avaliar o transporte de sedimentos e fluxo médio de energia, e a cota de inundação, ou seja, processa as séries temporais de dinâmicas marinhas e sedimentares que são necessárias como entrada dos modelos do SMC;
- (2) Sistema de Modelagem Costeira (SMC 3.0), ferramenta que reúne uma série de modelos numéricos que permitem analisar a estabilidade de uma praia (Programa de evolução do perfil transversal – Petra, Programa de Morfodinâmica de praias – Mopla). Também inclui um módulo de

modelagem do terreno (MMT) para a atualização de topografia e batimetria, dando suporte técnico prático à aplicação da metodologia de trabalho proposta nos Documentos Temáticos.

### 3.1.1 SMC Tools

O SMC Tools é um módulo básico necessário para as etapas de início e pré-processamento de um projeto que emprega a ferramenta SMC. É composto por três módulos principais:

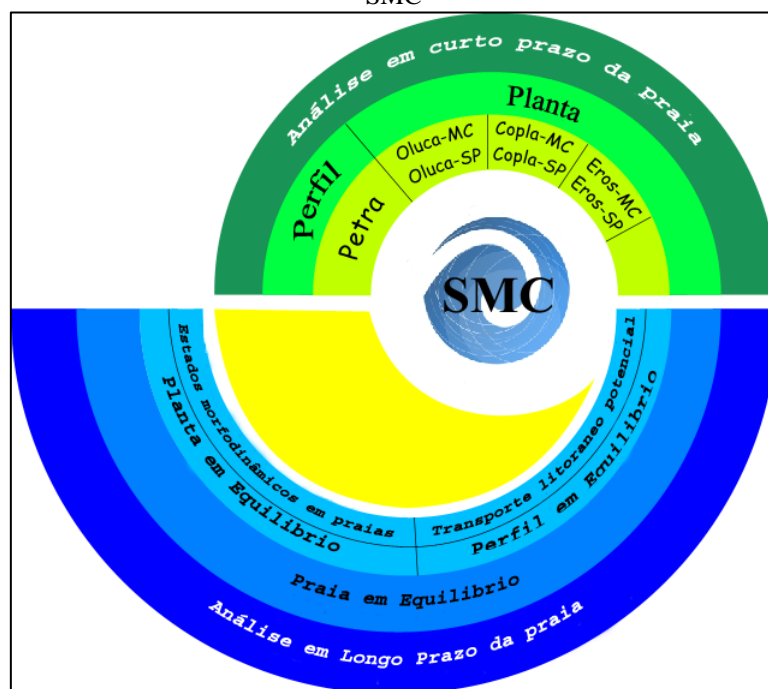
- (1) IH-DATA permite o acesso a três bancos de dados: o IH-DATA BACO, associado aos dados batimétricos obtidos das cartas náuticas do litoral brasileiro, o IH-DATA ONDA, associado ao banco de dados de ondas de reanálise numérica, e o IH-DATA NÍVEIS, associado aos níveis de mar obtidas por reanálise numérica.
- (2) IH-AMEVA é uma ferramenta utilizada no pré-processamento e análise estatística das variáveis ambientais dos bancos de dados de ondas e níveis, sendo complementar ao módulo IH-DATA.
- (3) IH-DYNAMICS permite a transferência de ondas exteriores a diferentes pontos situados na costa, avaliando o transporte longitudinal de sedimentos, a direção e a magnitude do fluxo médio de energia das ondas e a cota de inundação em um ponto da costa.

Os dois primeiros módulos são parte do pré-processamento de dados de entrada para a execução dos modelos numéricos. O terceiro faz parte do pós-processamento de dados de ondas a partir dos resultados obtidos com o SMC 3.0.

### 3.1.2 SMC 3.0

O SMC 3.0 é voltado às atividades no âmbito costeiro, compondo uma série de modelos numéricos, estruturados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a serem representados. O modelo é composto por uma série de modelos numéricos em planta e perfil, que analisam a dinâmica litorânea e a estabilidade de uma praia. Estão estruturados de acordo com as escalas espaciais e temporais de curto, médio e longo prazo (FIGURA 2).

FIGURA 2 - ESTRUTURA DE ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA – SMC



FONTE: IH CANTABRIA (no prelo (a)).

O módulo de análise de praias de curto prazo contém programas que analisam os sistemas costeiros em escala espacial e temporal de curto prazo (escalas de processos de horas até dias, por exemplo, o impacto de um temporal), é composto de modelos de evolução morfodinâmica no perfil 2DV (duas dimensões em vertical – Petra), e modelos de evolução morfodinâmica em planta 2DH (duas dimensões em horizontal – Mopla).

O módulo de análise de praias de longo prazo permite analisar uma região de costa em escalas espaciais e temporais a longo prazo (escalas de anos a décadas) através do programa denominado Praia em Equilíbrio. Num estudo de regeneração de um trecho da costa é importante definir uma escala de longa duração e como será a forma final da praia. A impossibilidade de estender modelos números de curto prazo para prever estas formas finais ao longo de grandes períodos de tempo favoreceu o uso de formulações de forma em planta e perfil de equilíbrio. A partir de uma batimetria inicial da área de estudo este programa integra estas formulações de equilíbrio, modelando a batimetria final de uma praia em equilíbrio, ou seja, determina qual será a forma final de uma praia mediante as formulações de forma em planta e perfil de equilíbrio.

O MMT permite modificar a batimetria incluindo ou retirando contornos rígidos (quebra-mares, espigões, muros, enrocamentos) e contornos maleáveis (engorda de areia, dragagens). Partindo de uma batimetria inicial de uma área de estudo, este programa

integra as formulações de equilíbrio, modelando a batimetria final e a configuração da costa depois de uma atuação.

Para o presente estudo será utilizado o módulo Mopla, componente do Acordes, utilizado para análise da morfodinâmica de praia em escala espaço-temporal de longo prazo.

### 3.1.3 Mopla

O módulo Mopla é composto por três modelos numéricos distintos que simulam a evolução morfodinâmica de uma praia, permitindo modelar a propagação e transformação das ondas sobre o domínio (Oluca), determinar o sistema de correntes (Copla) por meio dos tensores de radiação devido à propagação das ondas, e calcular o transporte de sedimento e evolução batimétrica (Eros), baseado no campo de ondas em correntes (IH CANTABRIA, no prelo (b)). Os três modelos numéricos trabalham sequencialmente, utilizando os dados de saída do modelo anterior como entrada para o modelo seguinte.

Inicialmente são calculados os campos de ondas para os casos obtidos no modelo Oluca. Os resultados finais são executados no Copla para o cálculo do campo de correntes em função dos tensores de radiação gerados pelas componentes de energia das ondas. Finalizando o processo, os dados de velocidade e direção do campo de correntes são utilizados para determinar o transporte de sedimentos (IH CANTABRIA, no prelo (b)).

### 3.1.4 Oluca

O modelo Oluca combina refração e difração, solucionando a aproximação parabólica fracamente não linear da equação da pendente suave, através da propagação de ondas monocromáticas (Oluca-mc) ou espectrais (Oluca-sp) em batimetrias irregulares, simulando os processos de empinamento, refração, dissipação de energia pelo contato com o fundo e pela quebra da onda, difração e interação onda-corrente (Gonzales *et al.*, 2007).

O Oluca-sp consiste em um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase MRF, com base nas equações do balanço da quantidade de movimento e fluxo de massa. Como requisito o modelo necessita da entrada de um contorno externo, um estado de mar direcional, o qual está representado por um espectro bidimensional discretizado em



componentes, frequências e direcionais, propagadas de maneiras simultâneas (IH CANTABRIA, no prelo (c)). Para a propagação das componentes de energia, a aproximação parabólica inclui refração-difração com interação onda-corrente (KIRBY; DALRYMPLE, 1986). O modelo prediz as perdas de energia em decorrência da quebra de ondas, utilizando três diferentes modelos estatísticos de dissipação, dos quais dois calculam a taxa média de dissipação de energia associada a uma “bore” ou degrau em movimento (BATTJES; JANSSEN, 1978; THORNTON; GUZA, 1986) e um terceiro que associa a taxa de dissipação ao gradiente entre o fluxo de energia estável e local (WINYU; TOMOYA, 1998).

A equação governante da propagação de ondas deste modelo é a Equação Parabólica da Pendente Suave (RefDif), desenvolvida por Radder (1979) e adaptada por Booij (1981). Radder (1979) utilizou uma metodologia de divisão de matrizes da equação elíptica de Berkhoff (1972), separando o campo de ondas em i) campo de ondas incidentes e ii) campo de ondas refletido, eliminando o segundo campo após a divisão. Contudo, a aproximação de Radder (1979) impõe uma restrição ao seu modelo parabólico: as ondas a serem propagadas devem ter direção dentro de  $\pm 45^\circ$  com relação ao eixo x (direção principal das malhas de propagação). Booij (1981) também desenvolveu um método de divisão de matrizes da equação elíptica, incluindo mais termos na aproximação das derivadas transversais, permitindo ao seu modelo parabólico a entrada de ondas com direções de até  $\pm 50^\circ$  com relação ao eixo principal. A formulação proposta pelo autor é a utilizada no modelo Oluca-sp para a propagação das ondas:

$$C_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)C_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{C_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[ p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - \frac{i\sigma k^2 N |A|^2 A}{2} = 0 \quad (1)$$

Onde:

$C_g$  = Celeridade de grupo

$A$  = Amplitude da onda

$p = CC_g$

$k$  = Número de onda de referência, tomado como a média ao longo do eixo

$N$  = Forma parte do termo não linear e é definido por:

$$N = \frac{(\cos h) 4kh + 8 - 2 \tan h^2 kh}{8 \operatorname{sen} h^4(kh)} \quad (2)$$

Onde  $h$  é a profundidade no ponto do domínio. As principais premissas e limitações do modelo são:

- A pressão é constante em toda a superfície livre modelada;
- Não considera a ação do vento e a ação de Coriolis;
- Variações no fundo são pequenas se comparadas ao comprimento de ondas. Para que o modelo obtenha resultados com alto desempenho, a declividade máxima indicada é de 1:3;
- Deve-se evitar grandes variações de profundidade no eixo  $y$ , pelo qual a ondulação entra na malha, assumindo ondulação igual em todos os pontos de contorno de entrada;
- Aproximação parabólica: As componentes se propagam principalmente em uma direção ( $x$ ). Quanto menor for a variação em relação a  $x$ , melhor será a solução (IH CANTABRIA, no prelo (c));
- Os contornos das malhas devem permanecer longe da área de estudo, pela ocorrência de instabilidade das ondas próximas aos contornos.

### 3.1.5 Copla

O modelo Copla é um modelo numérico que resolve as equações de fluxo dentro da zona de rebentação. As correntes geradas na costa influenciam de maneira significativa a configuração morfológica das praias, sendo, este sistema de correntes, notavelmente complexo. As correntes que podem contribuir para o desenvolvimento da linha de costa foram classificadas por Johnson (1919): correntes geradas pela ação das ondas, correntes de maré, correntes hidráulicas associadas às oscilações de baías, correntes geradas pela ação dos ventos, correntes planetárias associadas a sistemas oceânicos circulatórios, correntes gerada pela ação dos rios, dentre outras, sendo as mais importantes, as geradas pelas ondas.

O sistema circulatório na zona de quebra é dominado pela força de ação das ondas, associadas à quebra da mesma. A modelagem desse sistema é imprescindível para resolver o transporte sedimentar e as variações na linha de costa. O modelo Copla-sp consiste em um modelo bidimensional de corrente em praias que resolve as equações da continuidade e quantidade de movimento, obtidas a partir da equação de Navier-Stokes. As equações são integradas na profundidade e calculadas a um período de tempo em um

sistema de coordenadas, localizado no nível médio do mar ( $x$  = direção transversal à praia;  $y$  = direção longitudinal à praia e  $z$  = direção vertical) (IH CANTABRIA, no prelo (d)):

Continuidade:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Momento:

Direção  $x$  (transversal à praia)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \\ & \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy}) + \frac{gU}{c^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[ \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Direção  $y$  (longitudinal à praia)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial n}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xy}) + \\ & \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{yy}) + \frac{gV}{c^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[ \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

$$H = n + h \quad (6)$$

$$S_{xx} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^n (\rho u^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (7)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^n (\rho v^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (8)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^n \rho uv dz dt \quad (9)$$

$$V = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^n v(x, y, z, t) dz dt \quad (10)$$

$$n = \frac{1}{T} \int_t^{1+T} n(x, y, t') dt' \quad (11)$$

$$U = \frac{1}{T} \int_t^{1+T} \int_{-h}^n u(x, y, z, t) dz dt \quad (12)$$

A determinação dos campos de correntes gerados e das variações do nível médio se dá a partir do cálculo dos gradientes dos tensores de radiação. Como resultantes obtém-se o campo vetorial de velocidades e o campo de níveis sobre o domínio (IH CANTABRIA, no prelo (d)). Os tensores de radiação são calculados com base nos tensores gerados por cada componente de energia da onda. Tais componentes se propagam formando um ângulo  $\Theta$  em relação ao eixo  $x$  e à soma linear total destas em um ponto do domínio, determinando as seguintes expressões dos tensores de radiação:

$$S_{xx}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[ n_j (1 + \cos^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (13)$$

$$S_{yy}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[ n_j (1 + \sin^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (14)$$

$$S_{xy}(x, y) = \frac{1}{4} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 n_j \sin(2\theta_{jl}) \quad (15)$$

$$n_j = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2K_j h}{\sin h(2K_j h)} \right) \quad (16)$$

As variáveis dependentes do problema são  $\zeta$ ,  $U$ ,  $V$ , que representam a elevação da superfície livre sobre o nível de referência e as velocidades das correntes divididas na vertical em um período de tempo nas condições  $x$  e  $y$ .

As outras variáveis da equação são:

$A_{jl}(x, y)$  = amplitude para um componente frequencial  $j$  e direcional  $l$ , em uma onda irregular

$h$  = profundidade até o nível de referência

$H$  = profundidade total

$j$  = componente frequencial em uma onda irregular

$l$  = componente direcional em uma onda irregular

$n$  = relação de velocidade do grupo  $c_g$  em relação à velocidade de fase  $c$

$n_j$  = relação de velocidade de grupo  $c_{gj}$  em relação à velocidade  $c_j$  do componente frequencial  $j$

$t$  = tempo

$T$  = período da onda

$S_{xx}$  = tensor de radiação atuando no plano  $x$  ao longo do eixo  $x$

$S_{xy}$  = tensor de radiação atuando sobre o plano  $y$  e ao longo do eixo  $x$  (por simetria  $S_{xy}=S_{yx}$ )

$S_{yy}$  = tensor de radiação atuando no plano  $y$  ao longo do eixo  $y$

$\zeta(x,y,t)$  = elevação da superfície livre a partir do nível médio do mar

$u$  = velocidade instantânea em direção  $x$

$v$  = velocidade instantânea em direção  $y$

$E$  = energia da onda monocromática

$k$  = número de onda

$k_i$  = número de onda associado ao componente frequencial  $j$

$\theta$  = ângulo do vetor número de onda com o eixo  $x$

$\theta_l$  = ângulo do vetor número de onda com o eixo  $x$  para um componente frequencial  $j$  e direcional  $l$

$c$  = coeficiente de Chézy

$\hat{\alpha}$  = coeficiente de "Eddy viscosity" ou viscosidade de redemoinho

$P$  = pressão total (dinâmica mais estática)

$P_0$  = pressão estática a partir do nível médio de referência

$H_l$  = altura de onda

$g$  = aceleração da gravidade

$\tilde{n}$  = densidade do fluxo.

Baseia-se nas seguintes premissas e limitações (IH CANTABRIA, no prelo (b)):

- Densidade constante, fluido homogêneo e incompressível;
- A pressão é constante na superfície livre;
- Assume-se uma condição de reflexão total nas linhas de costas;
- A velocidade da corrente é independente da variação da profundidade;
- Não considera a ação de Coriolis;
- As correntes não apresentam força suficiente para influenciar a ação das ondas.

### 3.1.6 Eros

O modelo Eros calcula o transporte de sedimentos em suspensão e de fundo, baseado nos campos de ondas e correntes geradas pela ondulação propagada. O modelo resolve as equações do fluxo de sedimentos dentro da zona de rebentação, assim como as mudanças na batimetria associada às variações espaciais do transporte de sedimentos. Considera como dados de entrada os dados de saída de ondulação calculados pelo modelo Oluca, dados de saída de correntes geradas por quebra das ondas calculados pelo modelo Copla e dados característicos do sedimento da praia.

A modelagem da morfodinâmica para a zona de rebentação é utilizada para prever a evolução morfológica de uma praia sob influência da ação de determinadas condições de ondulação. Baseia-se na modelagem de processos físicos que afetam a praia, propagação de ondulação, correntes geradas pela quebra das ondas, transporte sedimentar e variação da batimetria. Dois tipos de modelos podem ser definidos, levando-se em consideração a interação entre esses componentes:

- 1) Modelos de erosão – sedimentação inicial (ESI), que avaliam a variação da batimetria desprezando a interação entre componentes, ou seja, a influência da variação do fundo na hidrodinâmica.
- 2) Modelos de evolução morfodinâmica (MEM), os quais levam em consideração a interação entre a variação do fundo e as condições hidrodinâmicas.

O modelo Eros realiza a simulação morfodinâmica tanto no modo ESI como no modo MEM. O modo ESI permite diagnosticar a tendência inicial de erosão-sedimentação de uma praia sob atuação de determinadas condições hidrodinâmicas. O modo MEM é utilizado para a estimativa das variações da batimetria de uma praia frente à ação de um evento extremo, exigindo maior tempo computacional, levando-se em conta o recálculo de ondulações e correntes. Para simulação da evolução morfológica de uma praia é imprescindível que todos os elementos (ondulação, correntes, transporte de sedimentos e variações de fundo) que regem os processos físicos estejam perfeitamente integrados, dada a forte interação entre eles. A partir da batimetria inicial e das características do sedimento o programa calcula o transporte de sedimentos; dos fluxos

de transporte é obtida a taxa de tempo de variação do fundo (IH CANTABRIA, no prelo (e)).

### 3.2 BASE DE DADOS SMC-BRASIL

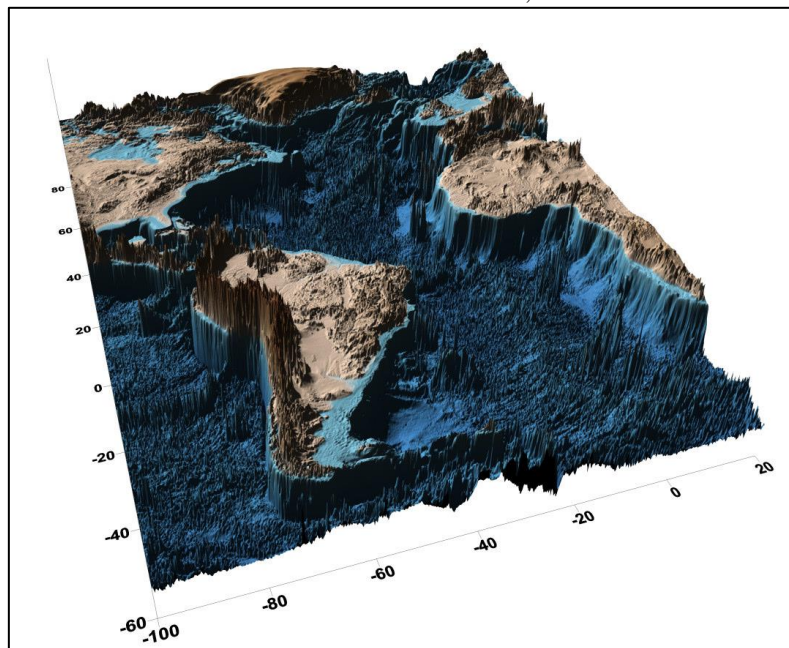
O SMC-Brasil apresenta uma base de dados de reanálise de ondas distribuído ao longo da costa brasileira, proporcionando informações em qualquer ponto da costa. Este banco de dados contempla duas séries horárias de estados de mar de 60 anos, metodologias e ferramentas necessárias para simular a propagação de ondas, de águas profundas até áreas próximas a praia, voltados para estudos da dinâmica costeira do Brasil com alta resolução espacial e temporal.

#### 3.2.1 Reanálise global (GOW)

A etapa de realização da reanálise global consiste na simulação numérica das condições de ondas globais durante um período de 60 anos, em decorrência das forçantes consideradas, sendo utilizadas uma malha global de resolução  $1.5^{\circ} \times 1^{\circ}$  e uma sub-malha na área do litoral brasileiro de resolução  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ . As simulações foram forçadas com a reanálise atmosférica NCEP/NCAR, incluindo a variabilidade de ventos globais e de áreas cobertas por gelo, com uma resolução espacial de  $1.9^{\circ}$  e temporal de 6 horas para o período de 1948-2008.

Para cada nó da reanálise foram obtidos os seguintes parâmetros:  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $\Theta_p$ ,  $\Theta$ , dispersão direcional e espectros direcionais. Para validação preliminar foram utilizados dados de altimetria de satélites das missões Jason 1, Jason 2, TOPEX, ERS-2, Envisat e GFO e de 21 boias em águas profundas nos oceanos Atlântico, Pacífico e no mar do Caribe, e posteriormente, os *outliers* foram filtrados. Esta filtragem é responsável pela eliminação de dados relacionados a furacões medidos pelos satélites, os quais não são adequadamente reproduzidos nos campos de vento em decorrência da resolução. Para a simulação de ondas nesta etapa foi utilizado como fonte batimétrica a base de dados “*General Bathymetric Chart of the Oceans*” – GEBCO (FIGURA 3), a qual reflete às características globais do fundo oceânico adequadamente. Os dados da batimetria estão disponibilizados através do “*British Oceanographic Data Centre*” – BDOC.

FIGURA 3 – BATIMETRIA EM ESCALA GLOBAL, PROVENIENTE DO GEBCO



FONTE: IH CANTABRIA (no prelo (f)).

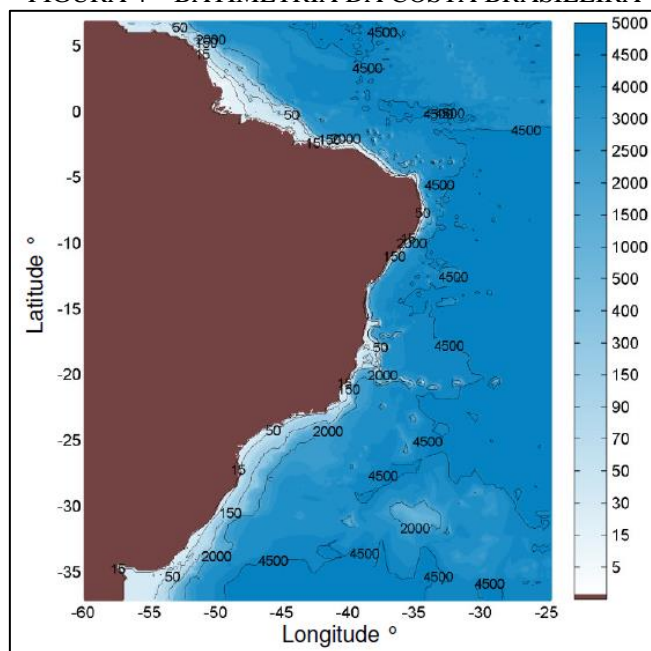
O modelo numérico utilizado para simulação das ondas foi o modelo WWIII (Wave Watch III), versão 2.2 (TOLMAN, 2002), de terceira geração, desenvolvido pela NOAA/NCEP. A versão III difere das anteriores em relação a pontos importantes, incluindo aspectos relacionados com a estrutura, método numérico de resolução e parametrizações físicas. O WWIII resolve a equação de equilíbrio da densidade espectral. Na resolução assume-se a hipótese de que as correntes, batimetria e campo de ondas variam espacial e temporalmente, em escalas maiores que um comprimento de onda. Uma limitação apresentada pelo modelo refere-se à qualidade da simulação dos efeitos de propagação das ondas em profundidades reduzidas; a baixa resolução da batimetria utilizada associada à qualidade das medições dos altímetros acoplados a satélites, não favorece a aplicação direta das simulações realizadas com esta fonte batimétrica aos estudos costeiros (áreas adjacentes à costa e de baixa profundidade). Assim o banco de dados GOW foi utilizado como condição de contorno de simulações regionais (DOW).

### 3.2.2 Transferência de dinâmicas em águas intermediárias (DOW)

Para melhorar a resolução da batimetria extraída do banco de dados GEBCO, foram incluídas informações das cartas náuticas do Brasil, inseridas no SMC-Brasil (FIGURA 4), de tal maneira que a cota 0 das cartas náuticas corresponde ao nível da Baixa Mar de Sizígia do Equador (BMVE).



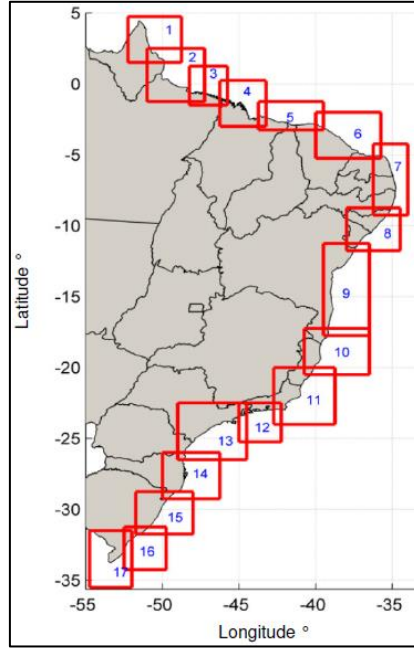
FIGURA 4 – BATIMETRIA DA COSTA BRASILEIRA



FONTE: IH CANTABRIA (no preto (f)).

A partir das informações das condições de ondas no exterior (banco de dados GOW) é possível conhecer as condições das ondas na área próxima à costa brasileira. Nesta etapa foi utilizada uma das sub-malhas situada frente à costa do Brasil, de resolução  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Os dados de cada nó são compostos por séries espectrais com duração de 60 anos. O período das séries é de 1948-2009. Foi selecionada uma série de pontos GOW como condições de contorno para a realização do *downscaling*, o qual considerou os campos de vento da reanálise global NCEP/NCAR a 10 metros de altitude.

Para a realização das simulações, 17 malhas retangulares de resolução 1 km x 1 km foram projetadas ao longo da costa brasileira. Os limites mar adentro delas coincide com a posição dos pontos GOW, sendo que existem zonas de sobreposição entre cada duas malhas vizinhas, visando reduzir a influência das fronteiras nos fluxos de ondas propagados até o interior das malhas. Abaixo pode-se observar a localização das malhas projetadas para a costa brasileira (FIGURA 5).

FIGURA 5 – MALHAS DE PROPAGAÇÃO UTILIZADAS NO *DOWNSCALING*

FONTE: IH CANTABRIA (no prelo (f)).

O modelo utilizado na realização do *downscaling* foi o SWAN (Delft University of Technology), baseado na equação da ação de onda que faz na média fase e não reconstrói a superfície do mar no espaço e tempo (Booij *et al.*, 1999), ou seja, possibilita a propagação de ondas em todas as direções, mesmo em superfícies extensas, não exigindo um número mínimo de pontos de cálculo por comprimento de onda. A equação que resolve o modelo de propagação SWAN é dada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (17)$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (18)$$

Trata-se de um modelo que resolve a equação de transporte de energia, onde as variações locais da energia espectral no tempo e as variações do fluxo de energia no espaço são compensadas com as saídas e entradas de energia no sistema. O espaço apresenta duas dimensões correspondentes ao espaço geográfico ( $x$  e  $y$ ) e duas dimensões correspondentes ao espaço espectral ( $\sigma$  e  $\theta$ ). A densidade de ação  $N(\sigma, \theta)$  é considerada no lugar da densidade de energia espectral  $E(\sigma, \theta)$  porque na presença de correntes, conserva-se a densidade de ação e não a densidade de energia. As variáveis independentes são  $\sigma$  (frequência relativa, no caso de correntes) e  $\theta$  (direção de incidência das ondas).

Na equação (17) o primeiro termo representa a variação local da densidade de ação no tempo, o segundo e o terceiro termos representam a propagação da ação no espaço geográfico (sendo  $C_x$  e  $C_y$  a velocidade de propagação da energia de ondas na direção  $x$  e  $y$ ). O quarto termo representa a mudança na frequência relativa em decorrência das variações na profundidade e nas correntes ( $C_\theta$ , representa a velocidade de propagação no espaço da frequência). O quinto termo represente a refração induzida pela profundidade ou as correntes (sendo  $C_\sigma$  a velocidade de propagação no espaço direcional). O termo localizado na parte direita da equação refere-se às fontes e sumidouros de energia espectral, considerando a geração de ondas por vento (onde são incluídos os ventos locais no *downscaling*), a dissipação de energia por *whitecapping*, o atrito com o fundo, e por rebentação das ondas.

Para cada ponto localizado em cada uma das 17 malhas existem 500 propagações de estados de mar em 3 níveis de maré. Estas propagações compõem o banco de dados DOW. As séries de estados de mar são obtidas através da interpolação de cada estado de mar entre as 1500 propagações realizadas, para determinação de séries de fluxos de ondas em um nível de maré e para determinação da série no nível de maré correspondente.

### 3.2.3 Base de dados de nível

O SMC-Brasil apresenta também uma base de dados de nível do mar, composta pela base de dados de maré astronômica (125 séries temporais) e maré meteorológica (24 séries), com duração de 60 anos (1948 – 2008) a um intervalo de tempo de 1 hora.

A base de dados de maré astronômica (GOT – Global Ocean Tides) provém da seleção de uma série de pontos ao longo da costa do Brasil (FIGURA 6), com uma resolução de 50 km, obtenção das constantes harmônicas desses pontos através do modelo global de marés TPXO (Egbert *et al.*, 1994) e predição das séries de maré astronômica por uso da ferramenta RomsTools (Penven *et al.*, 2007) e do modelo de análises harmônicas *t\_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002; IH CANTABRIA, no prelo (g)).

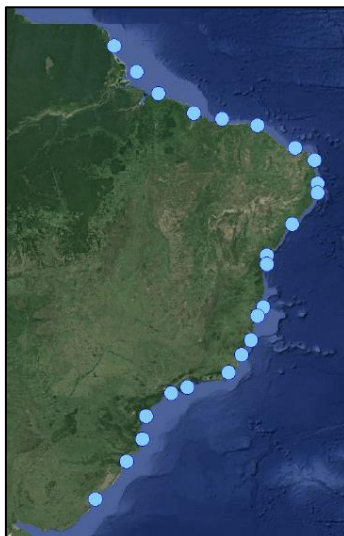
FIGURA 6 – PONTOS SELECIONADOS PARA A GERAÇÃO DA BASE DE DADOS DE MARÉ ASTRONÔMICA



FONTE: IH CANTABRIA (no prelo (g)).

A base de dados de maré meteorológica (GOS – Global Ocean Surge) é formada por uma seleção de séries de reanálises regionais ao longo da costa brasileira (FIGURA 7), simuladas numericamente com o modelo tridimensional de circulação ROMS (Regional Ocean Modeling System) (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005), o qual baseia-se em dados de variação do nível do mar decorrente de fatores atmosféricos (IH CANTABRIA, no prelo (g)). Apresenta 24 pontos de dados ao longo do litoral brasileiro, equidistantes em 100 km de série de dados com resolução temporal horária. A base GOS foi validada com os dados dos marégrafos UHSLC (IH CANTABRIA, no prelo (g)).

FIGURA 7 – PONTOS SELECIONADOS PARA A GERAÇÃO DA BASE DE DADOS DA MARÉ METEOROLÓGICA



FONTE: IH CANTABRIA (no prelo (g)).

## 4 METODOLOGIA

A metodologia seguida para a execução do presente estudo foi adaptada de Dalinghaus (2016), utilizando o SMC-Brasil para analisar a estabilidade da forma em planta e perfil nas praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses, litoral do estado de Santa Catarina.

### 4.1 DADOS DO CLIMA DE ONDAS

Para caracterização do clima de ondas na área de estudo, foram utilizados os dados obtidos por Porto Lima (2009) e Nemes (2011). Porto Lima (2009) mediu os parâmetros de ondas a 10 m de profundidade. O estudo identificou como principal direção de incidência de ondas o quadrante SE, com altura máxima de 5,44 m (Porto Lima *et al.*, 2009). Nemes (2011) caracterizou as ondas de superfície na plataforma interna rasa ao longo de 408 dias para a profundidade de 30 m, totalizando 2842 registros, e 488 dias para a profundidade de 18 m, com um total de 2389 registros. As maiores ondulações (*swell*) ocorrem no outono, período no qual as ondas de vento (*sea*) perfazem 63% do tempo. As medições realizadas entre julho de 2009 a junho de 2010 indicam o predomínio de quatro direções de propagação das ondas: SSE (28%), SE (25%), S (21%) e ESE (16%). Na profundidade de 18 metros a altura significativa de ondas foi de 1,6 metros, com máximo de 4,8 metros e período de pico médio de onda de 8,4 segundos, com máximo de 17,8 segundos (NEMES, 2011). Os valores encontrados foram utilizados como base para a escolha do ponto da simulação de propagação de ondas de águas profundas até à costa.

### 4.2 EXECUÇÃO DOS MODELOS

#### 4.2.1 Propagação de ondas

Estudos desenvolvidos na região costeira demandam batimetrias de alta resolução, às quais possibilitem o perfeito reconhecimento da zona intermaré, bancos, estruturas antrópicas, obtidas através de levantamentos de campo. Quando necessário, é possível realizar a edição das estruturas naturais e artificiais a partir do MMT. As transferências geradas no *downscaling* possibilitam a obtenção de séries de estados de

mar de longa duração (60 anos com frequência a cada 1 hora) em pontos próximos à costa; estas séries de estados de mar são condições de contorno para a propagação das séries até os pontos localizados na costa.

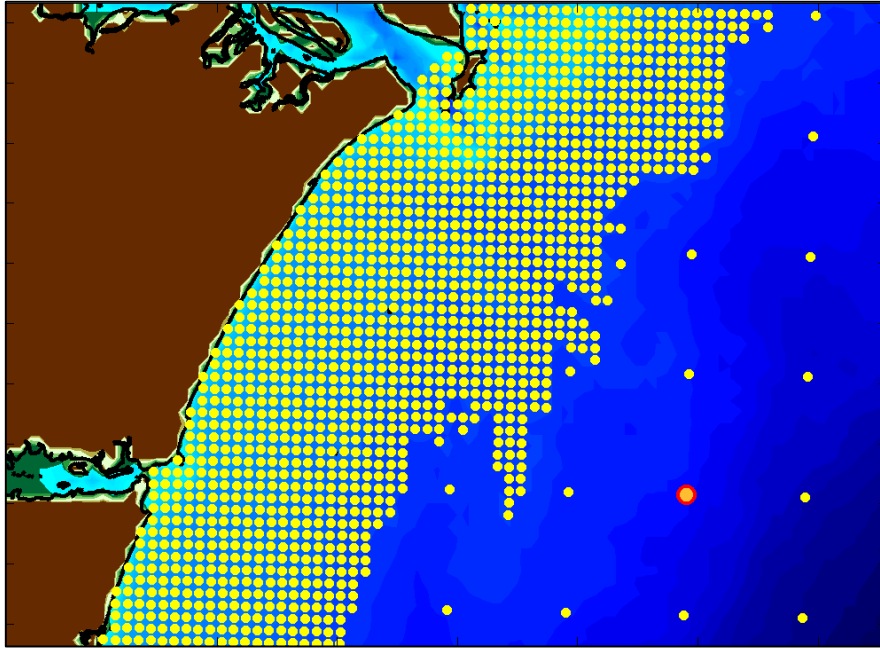
Para transferir os pontos DOW até pontos na costa é necessário selecionar os casos a serem propagados, realizar a propagação dos casos selecionados e posteriormente reconstruir a série em um ou mais pontos da praia, denominados pontos objetivos. A obtenção da série de ondas em pontos objetivos ao longo da linha de costa possibilita avaliar a direção da energia de onda, o transporte de sedimentos e resultados adicionais para entender a dinâmica de uma praia.

Na propagação dos casos de ondas será utilizado o modelo Oluca-sp, por representar bem todos os processos que afetam as ondas ao aproximar-se da costa: refração, difração, empinamento e arrebentação de ondas. As limitações apresentadas pelo modelo estão relacionadas aos tipos de ondas que pode propagar, principalmente a direção, uma vez que o modelo soluciona uma aproximação parabólica da equação da inclinação suave. Assim, para propagar todos os estados de mar contidos na série DOW escolhida, várias malhas precisam ser projetadas com orientações adequadas, levando-se em conta a variabilidade direcional das ondas na área estudada bem como as características da praia. Em praias de micro marés, é possível realizar a propagação em apenas um nível de maré, simplificando a execução; porém em praias de meso e macro marés é necessário propagar dois ou três níveis. Para a simulação realizada no presente estudo foi considerado um nível de maré (meia maré). As ondulações foram determinadas em função do período: *swell* ( $T_p > 8s$ ) e *sea* ( $T_p < 8s$ ).

#### 4.2.1.1 Seleção dos pontos (DOW)

Na escolha do ponto DOW para se realizar a propagação, leva-se em consideração a influência da profundidade na propagação das ondas, ou seja, o ponto escolhido deve satisfazer a relação ( $d > L/2$ ); se a razão for positiva, o ponto encontra-se em águas profundas. Caso seja negativa, o mesmo encontra-se em águas intermediárias, passíveis de sofrer a influência de algum processo (refração, empinamento). A partir da base de dados DOW foi determinado um ponto para as propagações de águas profundas até o arco praial Matinhos - Pontal do Sul (FIGURA 8).

FIGURA 8: PONTO DOW SELECIONADO PARA AS PROPAGACÕES DE ONDAS



FONTE: O autor (2016).

LEGENDA: O ponto escolhido é destacado pelo contorno na cor vermelha.

#### 4.2.1.2 Seleção de casos (MaxDiss)

A técnica da Máxima Dissimilaridade (MaxDiss) seleciona pontos dissimilares dentro da série, garantindo que os casos selecionados representem todas as condições de estados de mar da série de reanálise (Camus *et al.*, 2011). Os parâmetros de onda são padronizados, fazendo com que estes recebam o mesmo peso no critério de similaridade. A seleção dos casos é finalizada quando o algoritmo atinge o número de iterações escolhido pelo usuário. É utilizado o método da distância Euclidiana, calculando-se primeiro a distância do dado inicial com todos os elementos do subconjunto R e depois é eleito o dado de maior distância (CAMUS, 2009).

$$d_{ij} = \|X_i - v_j\|; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R \quad (19)$$

Onde:

$d_{ij}$  é a distância entre o dado inicial (N) e o subconjunto R ( $R \leq M$ )

$X_i$  é o parâmetro do caso analisado

$v_j$  representa a diversidade do dado

Por fim os dados são transformados e retornam à configuração inicial. Quanto maior o número de casos selecionados, mais representativa é a seleção e, consequentemente, mais consistente é a reconstrução de séries em águas rasas. No entanto, Camus (2009) constatou que acima de 100 casos selecionados, os erros referentes à seleção tornam-se poucos representativos. Foram selecionados 100 casos entre as direções ( $50^\circ$  e  $170^\circ$ ), representando as direções de ondas que atingem o arco praial. As direções determinadas para a simulação representam os ângulos a partir das quais é possível se propagar com o modelo Oluca na área de estudo, excluindo casos com direções oriundas do continente ou direções que não atingem as praias do arco praial.

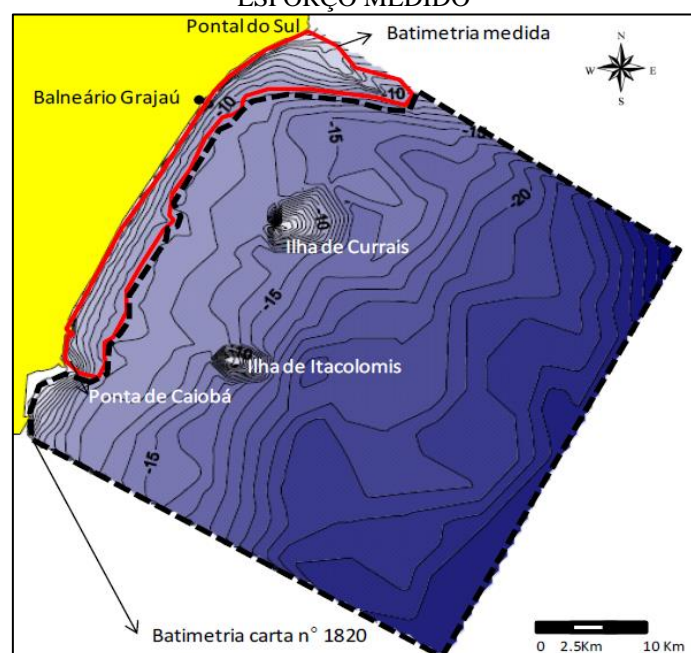
#### 4.2.1.3 Inserção da batimetria de detalhe

Para estudos realizados na zona costeira, é preciso utilizar uma batimetria da área a ser estudada que represente o fundo de forma mais real possível ao longo do domínio modelado, a fim de melhorar a resolução e, consequentemente, os resultados obtidos na modelagem. Esta batimetria é obtida através de levantamentos de campo, sendo utilizada na propagação de ondas, correntes, transporte de sedimentos e cálculo do perfil praial.

Foram utilizadas nesta etapa a batimetria extraída das cartas náuticas da DHN digitalizadas dentro do banco de dados batimétricos do SMC-Brasil e dados de batimetria obtidos por Nemes (2011), utilizando um ecobatímetro GARMIN 178C e interpolação com dados batimétricos de uma carta náutica da região (Brasil Costa – Sul, Marinha do Brasil, 1975, n°. 1820). Abaixo é apresentada uma imagem da batimetria gerada e a batimetria da carta náutica (FIGURA 9).



FIGURA 9: BATIMETRIA GERADA POR NEMES (2011) ATRAVÉS DA INTERPOLAÇÃO DO ESFORÇO MEDIDO



FONTE: NEMES (2011).

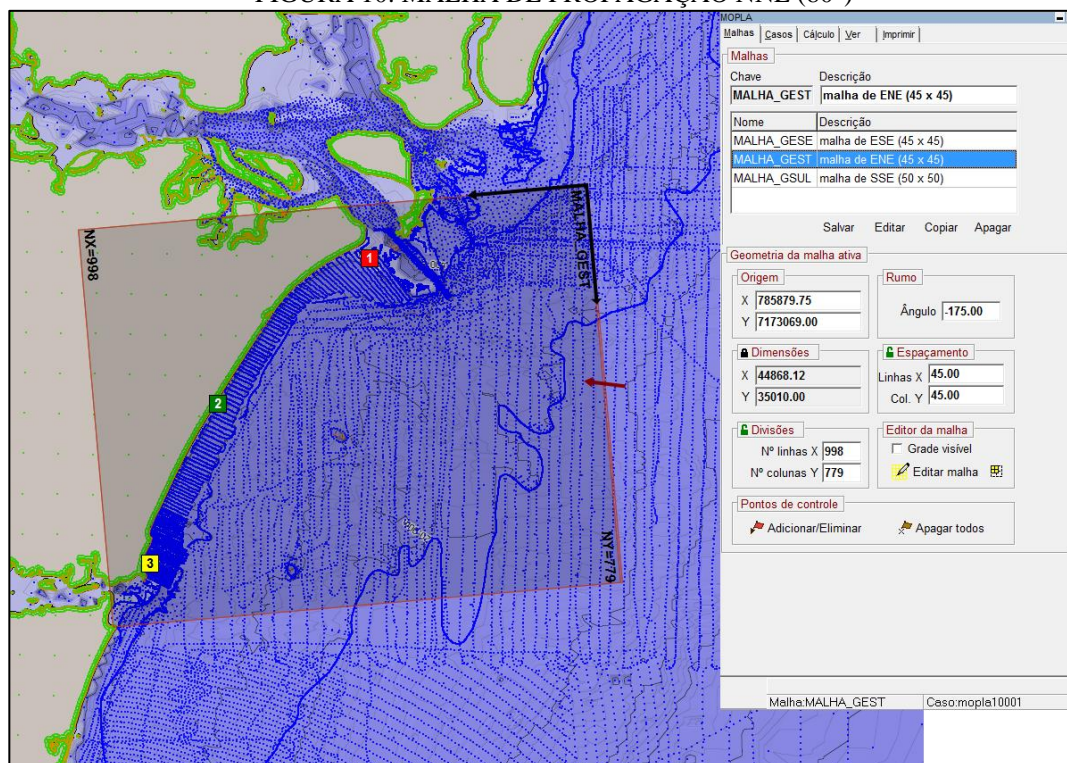
LEGENDA: Batimetria gerada (em vermelho) e dos dados da carta náutica nº 1820 (linha tracejada)

#### 4.2.1.4 Confeccção das malhas de propagação

Para a determinação da orientação e dimensão das malhas de propagação deve-se levar em consideração a série de onda a se propagar, a orientação da praia e as características geométricas dos contornos na área de estudo. Primeiro define-se as características das ondas em profundidades indefinidas; estabelece-se o limite de águas profundas ( $d/L > 0.5$ ) para ondas típicas de tempestades e em condições médias; analisar a configuração da batimetria exterior e de detalhe (orientação das linhas batimétricas, baixios, feições morfológicas); orientar a(s) malha(s) em função da onda incidente e os contornos e orientação da praia; analisar a necessidade de aninhar malhas de detalhe, dependendo da variação da batimetria e do cálculo de correntes na praia; e finalmente definir os limites laterais e dimensionamento da malha.

Foram utilizadas 3 malhas de propagação para a área de estudo (FIGURAS 10, 11 e 12). Posteriormente à seleção dos casos e construção das malhas de propagação é realizada a propagação das ondas propriamente dita.

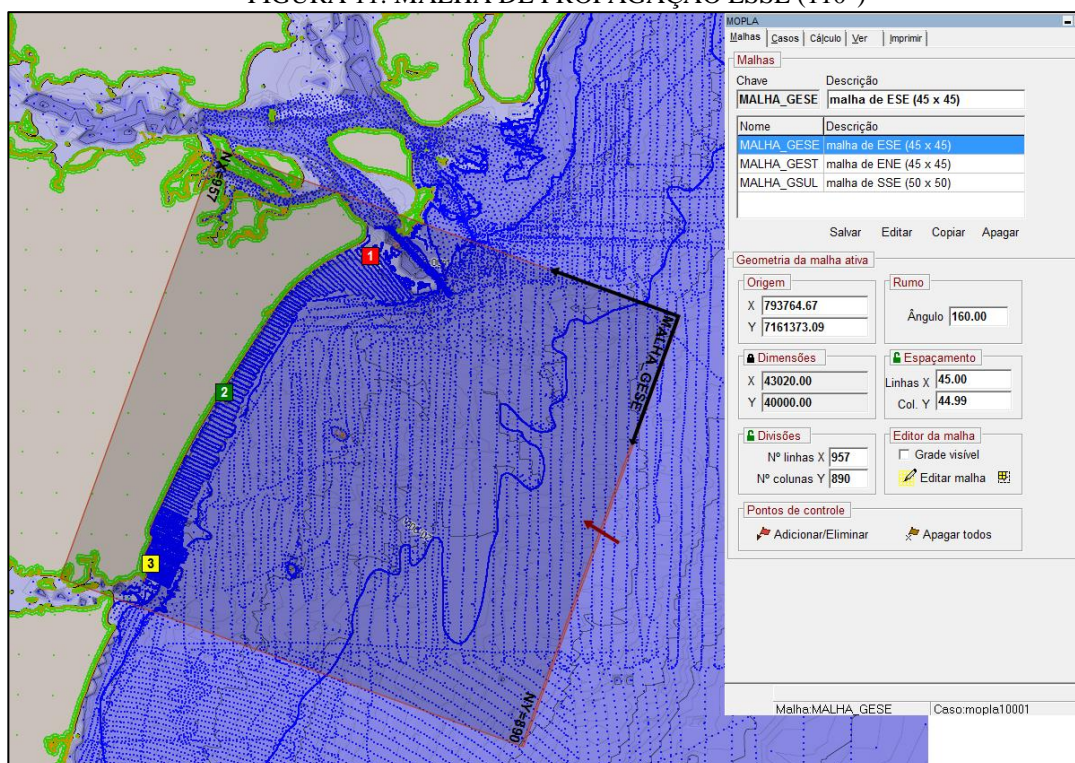
FIGURA 10: MALHA DE PROPAGAÇÃO NNE (80°)



FONTE: O autor (2016).

NOTA: A seta vermelha indica a direção de propagação de ondas.

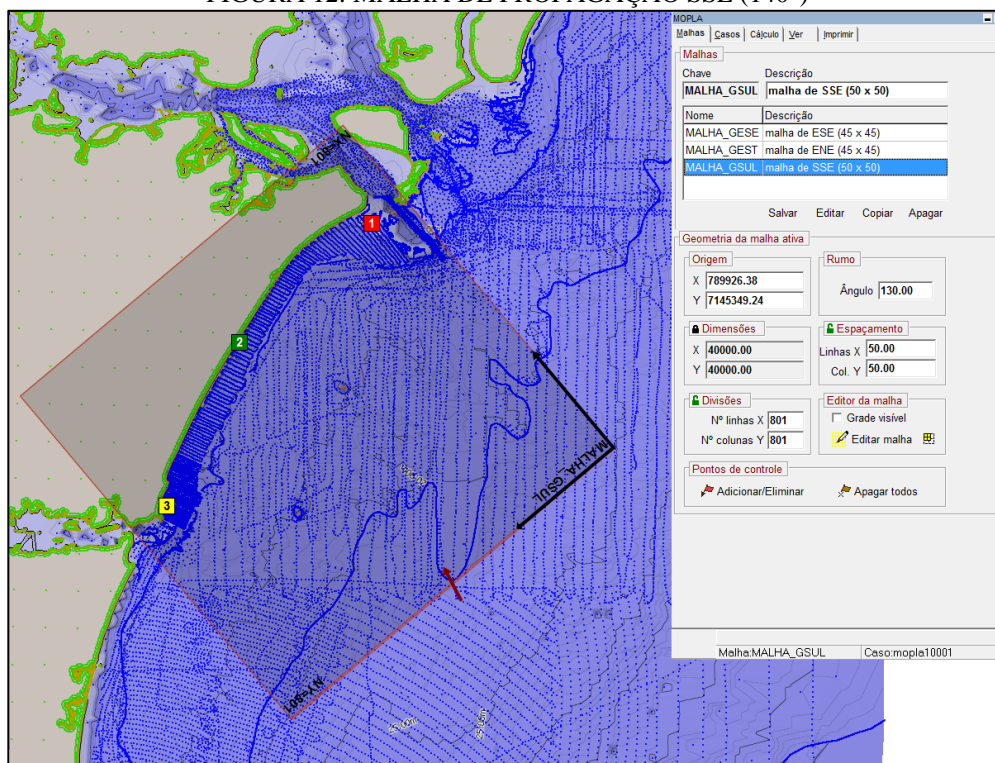
FIGURA 11: MALHA DE PROPAGAÇÃO ESSE (110°)



FONTE: O autor (2016).



FIGURA 12: MALHA DE PROPAGAÇÃO SSE (140°)



FONTE: O autor (2016).

#### 4.2.1.5 Propagação dos casos

A propagação de águas profundas para águas rasas será executada utilizando o modelo Oluca-sp, que representa bem o comportamento das ondas frente aos processos de refração, difração e empinamento.

#### 4.2.1.6 Reconstrução da série em águas rasas

Após a propagação das ondas até águas rasas, é possível reconstruir as séries temporais através da interpolação RBF, em um ou vários pontos ao longo de um perfil. A técnica considera a aproximação RBF constituída por uma combinação linear de funções radiais simétricas localizadas nos pontos de dados. A reconstrução das séries no ponto escolhido ocorre em função dos casos selecionados e dos valores em águas profundas para cada parâmetro:

$$\text{RBF}(Z) = p(Z) + \sum a_j \phi(\|Z - Z_j\|) \quad (20)$$

Onde:

$RBF(Z)$  é a função de interpolação

$Z$  é o caso de onda em águas profundas

$p(Z)$  é uma função de base monomial

$a_j$  é o coeficiente da RBF

$\phi$  é a função de base radial para aquele parâmetro

$Z - Z_j$  é a distância euclidiana entre o parâmetro em águas profundas ( $Z$ ) e o mesmo em águas rasas ( $Z_j$ ) (Camus *et al.*, 2011).

A partir das séries reconstruídas é possível estudar o comportamento de uma praia, identificar a zona de rebentação, o transporte de sedimentos, o fluxo de energia, dentre outros.

#### 4.3 Análise de longo prazo em praias

A análise de longo prazo em praias tem como objetivo determinar e identificar a evolução temporal da área estudada em uma escala interanual, em função dos processos existentes na região.

#### 4.4 Simulação das correntes

A dinâmica das correntes na área estudada foi determinada através do modelo espectral de cálculo de correntes Copla-sp. Os dados de ondas de entrada para o cálculo da magnitude das correntes, direção e tensores de radiação foram os dados de saída obtidos através da execução do modelo Oluca-sp.

#### 4.5 Transporte de sedimentos

O cálculo do transporte sedimentar presente no SMC-Brasil baseia-se na determinação do transporte potencial a partir da formula do *Coastal Engineering Research Center* (CERC) (USACE, 2002) sobre um perfil de praia, onde são considerados os parâmetros como período, altura de quebra e variação do ângulo de incidência das ondas, para o cálculo do balanço sedimentar da praia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 DADOS DO CLIMA DE ONDAS

As direções de incidência de ondas predominantes para o ponto DOW escolhido para a propagação de ondas de águas profundas até o arco praial, obtidas a partir do banco de dados de ondas do SMC-Brasil, foi de ESE (51%), SE (27%), E (12%) e SSE (7%), com altura significativa ( $H_s$ ) de 1,61m a 3,09m (ESE), 1,76m a 3,61m (SE), 1,38m a 2,81m (E) e 1,98 a 4,1m (SSE), e período de pico médio ( $T_p$ ) de 7s a 13s (ESE), 8s a 14s (SE), 7s a 11s (E) e 9s a 14s (SSE), respectivamente. Os valores para  $H_s$  e  $T_p$  são apresentados nas tabelas abaixo.

TABELA 1: DIREÇÕES DE INCIDÊNCIA DE ONDAS PREDOMINANTES E ALTURAS SIGNIFICATIVAS PARA O PONTO DOW ESCOLHIDO

direções(Nº)	prob.direção	$H_{s_{50\%}}$	$H_{s_{90\%}}$	$H_{s_{99\%}}$	$H_{s_{12}}$
N	0.0004	1.2729	1.7049	2.0112	2.0221
NNE	0.0006	1.2989	1.6462	1.8645	1.9570
NE	0.0011	1.2360	1.5886	1.8324	2.1041
ENE	0.0037	1.1536	1.5380	2.2262	2.7996
E	0.1237	1.3854	1.9069	2.4383	2.8109
ESE	0.5094	1.6160	2.2179	2.7318	3.0971
SE	0.2759	1.7648	2.3721	3.0627	3.6145
SSE	0.0734	1.9830	2.6481	3.4444	4.1052
S	0.0082	1.7711	2.4722	2.9845	3.4243
SSW	0.0016	1.4800	1.9596	2.4935	2.6136
SW	0.0005	1.4431	1.9646	2.2920	2.3200
WSW	0.0003	1.3846	2.0419	2.2723	2.2958
W	0.0003	1.4072	1.7200	1.9474	1.9637
WNW	0.0003	1.3021	1.6350	1.9716	1.9827
NW	0.0003	1.2435	1.5531	1.9550	1.9622
NNW	0.0003	1.2713	1.5515	1.9767	1.9874

TABELA 2: DIREÇÕES DE INCIDÊNCIA DE ONDAS PREDOMINANTES E PERÍODO DE PICO PARA O PONTO DOW ESCOLHIDO

direções(Nº)	prob.direção	TP <sub>50%</sub>	TP <sub>90%</sub>	TP <sub>99%</sub>	TP <sub>12</sub>
N	0.0004	5.4704	6.7011	8.8152	8.8332
NNE	0.0006	6.4603	7.9594	9.3593	9.9671
NE	0.0011	6.9133	8.2969	9.3817	9.5226
ENE	0.0037	7.3351	8.8419	9.8721	10.6446
E	0.1237	7.3827	9.0195	10.3482	11.3819
ESE	0.5094	7.2741	9.2785	11.4538	13.2556
SE	0.2759	8.0013	10.8560	13.3975	14.8144
SSE	0.0734	9.3048	12.3969	14.1973	14.8592
S	0.0082	8.0640	12.3879	14.1232	14.6556
SSW	0.0016	6.3414	7.9936	9.8677	11.2080
SW	0.0005	5.8939	7.6406	10.5633	11.8887
WSW	0.0003	5.4312	8.3370	10.3707	10.4997
W	0.0003	4.9727	6.4733	7.4030	8.0047
WNW	0.0003	4.5487	6.0676	7.5009	8.3465
NW	0.0003	4.8666	6.5680	7.6299	8.0108
NNW	0.0003	5.1997	6.8070	9.7376	9.7573

## 5.2 ANÁLISE DE LONGO PRAZO EM PRAIAS

Os resultados obtidos através das simulações no Sistema de Modelagem Costeira foram comparados com os dados coletados em campo por Quadros (2016, no prelo). O período de coleta de dados estendeu-se de 10 de maio de 2006 a 07 de maio de 2009. Levando-se em conta a base de dados do modelo (1948 a 2008), o período definido para comparação foi de 10/05/2006 a 03/12/2008. Quadros (2016, no prelo), realizou 24 levantamentos planialtimétricos com periodicidade mensal em 14 pontos localizados na orla central da costa paranaense, nos balneários de Atami, Marisol, Ipanema, Guarapari, Santa Terezinha, Praia de Leste e Monções, no município de Pontal do Paraná, e balneários Caravelas (perfil San Marino), Riviera (perfil Matinhos 6), Flamingo (perfil Matinhos 5), Matinhos (perfis Matinhos 4, Matinhos 3 e Matinhos 2) e Caiobá (perfil Matinhos 1) localizados no município de Matinhos.

Para fins de comparação, os perfis realizados utilizados foram os de Atami, Marisol, Santa Terezinha, Caravelas (San Marino) e Riviera (Matinhos 6), levando-se em conta a localização dos mesmos no arco praias Matinhos-Pontal do Sul.

### 5.2.1 Atami

A variação volumétrica para o perfil Atami a partir da simulação numérica apresentou valores negativos para os três anos analisados, com maior taxa de retirada de sedimentos durante o ano de 2006 (FIGURA 16). Os dados obtidos em campo apresentaram valores positivos para os anos 2006 e 2007, com maior taxa de acreção para o ano de 2007, e retirada de sedimentos no ano de 2008 (FIGURA 14). Os menores valores para os volumes totais de sedimentos mobilizados anualmente foram encontrados no perfil Atami, para os dados simulados (FIGURA 15).

### 5.2.2 Marisol

O perfil Marisol apresentou maior suscetibilidade a processos erosivos para os perfis simulados, com os maiores valores negativos para os três anos entre todos os pontos estudados (FIGURA 16). Os resultados obtidos em campo evidenciam saldo negativo da variação volumétrica sedimentar, com processos erosivos para os anos de 2006 e 2008, e deposicionais para o ano de 2007 (FIGURA 14). Os maiores valores para os volumes totais de sedimentos mobilizados anualmente foram encontrados no perfil Marisol, para os dados medidos em campo (FIGURA 13).

### 5.2.3 Santa Terezinha

O saldo da variação volumétrica sedimentar obtido através da simulação numérica para o perfil Santa Terezinha evidenciou aporte sedimentar para os três anos, com os maiores valores de acreção para o ano de 2008 (FIGURA 16). Os dados medidos em campo apresentaram valores positivos para o ano de 2006 e valores negativos para os anos de 2007 e 2008 (FIGURA 14).

### 5.2.4 San Marino

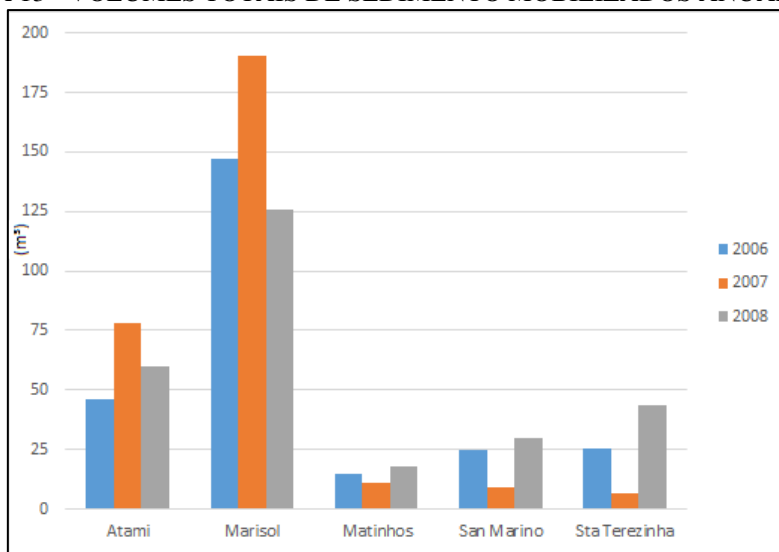
A simulação numérica para o perfil San Marino apresentou saldo de variação volumétrica negativo para os três anos analisados, com valores negativos para os anos de 2006 e 2007, sendo este último com maior variação volumétrica, e valores positivos para o ano de 2008 (FIGURA 16). Os dados coletados em campo evidenciam a retirada de

sedimento, com saldo da variação volumétrica negativo para os três anos, e maiores valores da variação volumétrica para o ano de 2006 (FIGURA 14).

### 5.2.5 Matinhos

O saldo da variação volumétrica sedimentar para o perfil Matinhos obtido a partir da simulação numérica foi negativo para os três anos analisados, apresentando maior variação volumétrica para o ano de 2007 (FIGURA 16). Os valores obtidos em campo mostram saldo da variação volumétrica negativo para os anos de 2006 e 2008, com as maiores variações para o ano de 2008, e valores positivos para o ano de 2007 (FIGURA 14). Os maiores valores para os volumes totais de sedimentos mobilizados anualmente foram encontrados no perfil Matinhos, para os dados simulados (FIGURA 15), contrariamente aos valores para os volumes totais de sedimentos mobilizados anualmente medidos em campo (FIGURA 13), o qual apresenta as menores taxas.

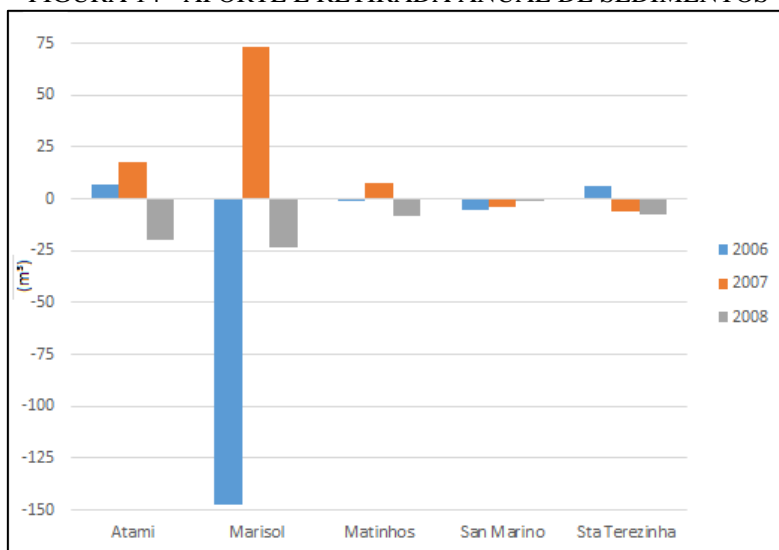
FIGURA 13 - VOLUMES TOTAIS DE SEDIMENTO MOBILIZADOS ANUALMENTE



FONTE: Adaptado de QUADROS (2016, no prelo).



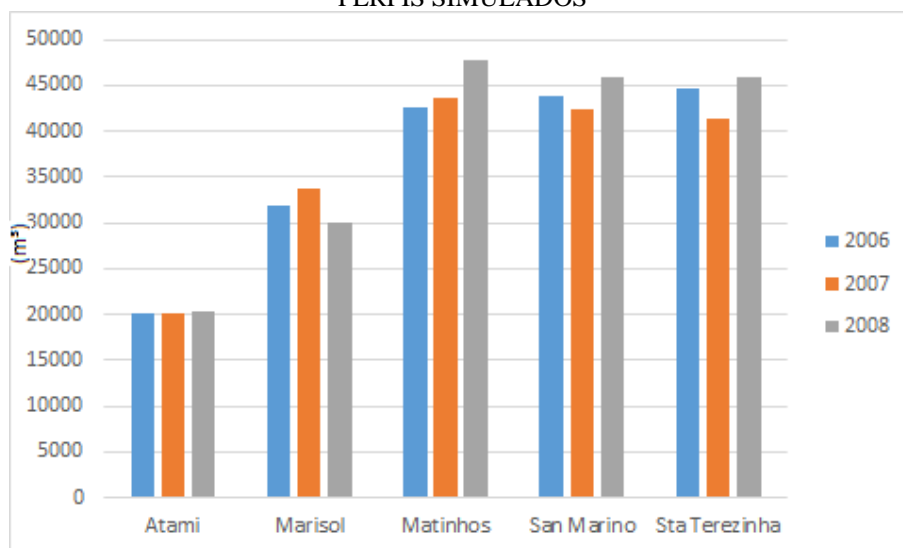
FIGURA 14 - APORTE E RETIRADA ANUAL DE SEDIMENTOS



FONTE: Adaptado de QUADROS (2016, no prelo).

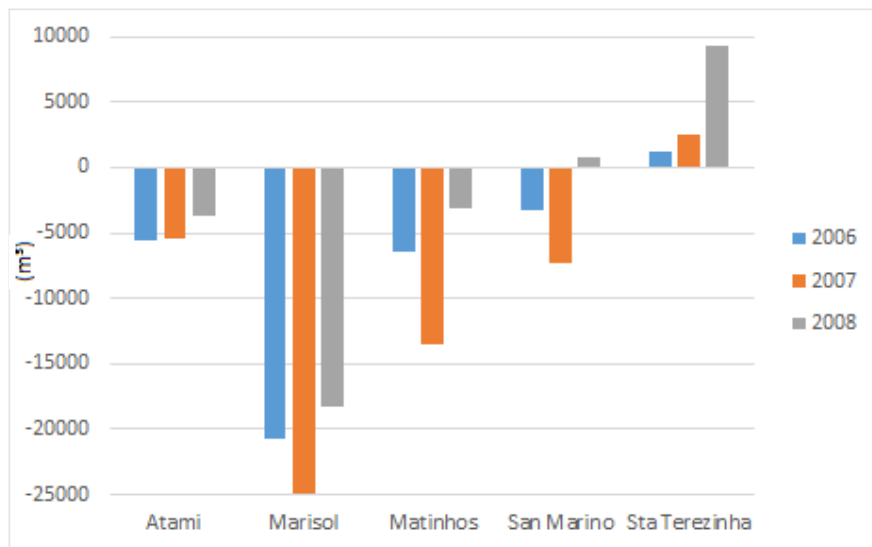
NOTA: Valores negativos significam retirada de sedimentos.

FIGURA 15 - VOLUMES TOTAIS DE SEDIMENTOS MOBILIZADOS ANUALMENTE PARA OS PERFIS SIMULADOS



FONTE: O autor.

FIGURA 16 - APORTE E RETIRADA ANUAL DE SEDIMENTOS PARA OS PERFIS SIMULADOS



FONTE: O autor (2016).

NOTA: valores negativos significam retirada de sedimentos.

Os valores brutos utilizados no estudo podem ser encontrados nas tabelas 3 e 4 disponibilizadas nos anexos.

A discrepância encontrada entre os valores dos resultados da simulação numérica e os valores dos dados obtidos em campo pode ser justificada pelas limitações encontradas, tanto na realização dos levantamentos de perfis planialtimétricos, quanto pelas limitações do modelo numérico utilizado. Os levantamentos de campo, apresentam como limitações a condição climática, a profundidade máxima possível de medição, influenciando o comprimento e a área do perfil (com alcance máximo de metros), a periodicidade da realização dos levantamentos, ocorrida uma vez a cada mês, no estudo em questão, bem como a replicação do levantamento no local exato realizado anteriormente.

Nesse contexto a modelagem numérica permite a realização do cálculo do transporte sedimentar para áreas mais extensas (de metros a quilômetros). As premissas básicas das ferramentas numéricas utilizadas (Oluca-sp) desprezam a ação dos ventos e outras forças naturais, como a força de Coriolis na zona de arrebentação. Aliado a isto, as fórmulas utilizadas para os cálculos de transporte sedimentar podem superestimar os valores do transporte sedimentar.

## 6 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas é possível classificar o SMC-Brasil como uma alternativa para a estimativa do transporte sedimentar, identificação de pontos de erosão e acreção no arco praial Matinhos-Pontal do Sul, levando-se em conta as características da área de estudo em questão (praias oceânicas expostas e dissipativas, com baixa ocorrência de promontórios e ilhas com competência de alterar a direção das ondas).

A análise do balanço sedimentar do perfil praial para os cinco pontos analisados a partir da modelagem numérica demonstraram tendência erosiva para os perfis Atami, Marisol, Matinhos e San Marino e acreção para o perfil Santa Terezinha, durante os anos de 2006, 2007 e 2008. Essas variações podem ser explicadas como resposta ao ajuste da linha de costa atual frente ao clima de ondas e disponibilidade de sedimentos.

A aplicabilidade da modelagem numérica para estudos relacionados à dinâmica costeira tem se mostrado bastante eficiente. Dalinghaus (2016), Almeida *et al.* (2015), Gomes da Silva *et al.* (2015), Gomes da Silva (2014) e Sprovieri (2012) utilizaram o SMC-Brasil na análise do clima de ondas, estabilidade da praia em planta e perfil, balanço sedimentar e variações da linha de costa, nos quais o modelo numérico mostrou-se eficaz. Contudo, sempre deve-se levar em consideração que o uso de reanálises numéricas de dados de ondas é realizado a partir de dados modelados e não medidos. Para o cálculo do balanço sedimentar do estudo foram analisados dados de ondas, bem como para a análise do perfil praial. Levou-se em conta que somente as ondas sofreram mudanças, porém há outros fatores que também variam, como o aporte sedimentar, o nível médio do mar, entre outros.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. R.; AMARO, V.E.; MARCELINO, A.M.T. et al. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (Rio Grande do Norte-Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. **Gestão Costeira Integrada**, [http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-532\\_Almeida.pdf](http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-532_Almeida.pdf),| DOI:10.5894/rgci532. 2015.
- ANGULO, R. J. Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. **Boletim Paranaense Geociências**, Curitiba, n. 41, p. 52-72, 1993.
- ANGULO, R. J.; ARAÚJO, A. D. de. Classificação da costa paranaense com base na sua dinâmica, como subsídio à ocupação da orla litorânea. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 44, p. 7-17, 1996.
- ANGULO, R. J. As praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, n. 99, p. 97-103, jul/dez. 2000.
- ANGULO, R. J.; SOARES, C. R.; MARONE, E.; SOUZA, M. C. de; ODRESKI, L. L. R.; NOERNBERG, M. A. Paraná. In: **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. p. 347-400.
- ANGULO, R. J., BORZONE, C. A., NOERNBERG, M. A., QUADROS, C. J. L. de, SOUZA, M. C. de; ROSA, L. C. da. The State of Paraná Beaches. In: SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. da F. (Ed.). **Brazilian Beach Systems**. Springer International Publishing AG Switzerland, 2016. p. 419-464.
- BATTJES, J. A.; J. P. F. M. JANSSEN. Energy loss e set-up due to breaking of random waves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 16., 1978, Hamburg. Hamburg: ASCE – American Society of Civil Engineers, 1978. p. 569-587.
- BERKHOF, J. C. W. Computation of combined refraction-diffraction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 13., 1972, Vancouver. Vancouver: ASCE – American Society of Civil Engineers, 1972. p. 471-490.
- BESSA JUNIOR, O. **Interferência entre a ocupação urbana e a dinâmica natural no litoral sul do Paraná**. 156 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- BOOIJ, N. **Gravity waves on water with non-uniform depth e current**. 131 f. Thesis (Doctoral in Civil Engineering and Geosciences) – Department of Hydraulic Engineering, Delft University of Technology, Delft, 1981.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, Delft, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, apr. 1999.
- CAMUS, P.; MENDEZ, F.; & MEDINA, R. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 58, n. 9, p.851-862, set. 2011.

CAMUS, P.; MENDEZ, F.J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 72, p. 56-68, feb. 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

COWELL, P. J., & THOM, B. G. Morphodynamic of coastal evolution. In: CARTER, R. W. G.; WOODROFFE, C. D. (Ed.). **Coastal Evolution**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 33-86.

DALINGHAUS, C. **Análise da estabilidade da forma em planta e perfil nas praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses, Florianópolis – SC: aplicações em análise de perigos costeiros**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

EGBERT, G. D.; BENNETT, A. F.; FOREMAN, M. G. G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, p. 24821-24852, dec. 1994.

FONTOURA, J. A. S. **Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil**. 281 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FORTUNATO, A. B.; CLÍMACO, M.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, A.; SANCHO, F.; FREIRE, P. Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Proteção. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 1, p. 45-63, 2008.

GOMES DA SILVA, P. **Exposição à inundação costeira nas praias dos Ingleses, Moçambique e Barra da Lagoa, Florianópolis, SC**. 237p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GOMES DA SILVA, P.; KLEIN, A.H.F.; GONZÁLEZ, M.; GUTIERREZ, O.; ESPEJO, A. Performance assessment of the database downscaled ocean waves (DOW) on Santa Catarina coast, South Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 2, p.623-634, 2015.

GONZALES, M.; MEDINA, R.; GONZALES-ONDINAS, J.; OSÓRIO, A.; MÉNDEZ, F.; & GRÁCIA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 7, p. 916-931, jul. 2007.

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual do Usuário – SMC Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (a).

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – SMC-Tools**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (b).

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – OLUCA-SP**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (c).

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – COPLA-MC/SP**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (d).

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – EROS**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (e).

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Documento Temático – Ondas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (f).

IH CANTABRIA, INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Ed). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Documento Temático – Níveis**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (g).

JOHNSON, I. G. **Shore Processes and Shoreline Development**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1919.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. Modelling waves in surfzones and around Islands. **Journal of Waterway, Port, Coastal e Ocean Engineering**, v. 112, n. 1, p. 78-93, jan. 1986.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

NEMES, D. D. **Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do estado do Paraná**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

QUADROS, C. J. L. de. **Variações morfológicas e volumétricas associadas à incidência de sistemas frontais em duas praias arenosas do litoral paranaense**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

QUADROS, C. J. L. de. **Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas do arco praial Pontal do Sul - Caiobá, PR**. No prelo.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. **Computers and Geosciences**, v. 28, n. 8, p. 929-937, oct. 2002.

PENVEN, P.; MARCHESIELLO, P.; DEBREU, L.; LEFEVRE, J. Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 5, p. 660-662, may. 2008.

RADDER, A. C. On the parabolic equation method for water-wave Propagation. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 95, n. 1, p. 159-176, nov. 1979.

REGUERO, B. G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F. J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I. J. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, jul. 2012.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS) a split-explicit, free-surface, topography following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling**, v. 9, n. 4, p. 347-404, 2005.

SOARES, C. R., BORZONE, C. A.; SOUZA, J. R. B. de. Variações morfológicas e sedimentológicas ao longo de um ciclo anual numa praia arenosa no sul do Brasil. **Oecologia Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 245-258, 1997.

SPROVIERI, F. C.; FONTOURA, J. A. S. Modelagem numérica do potencial hidrodinâmico e do transporte de sedimentos na praia do cassino e no entorno dos molhes da barra de Rio Grande (RS), utilizando o modelo SMC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 187-195, 2012.

STRAUCH, J. C. Caracterização do estado de mar em Rio Grande. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14., 2001, Aracajú. **Anais...** Aracajú, SE.

THORNTON, E. B.; GUZA, R. T. Surf zone longshore currents e random waves: Field data e models. **Journal of Physical Oceanography**, v. 16, n. 7, p. 1165-1178, jul. 1986.

TOLMAN, H. L. Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. **Parallel Computing**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 35-52, jan. 2002.

USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS), Longshore Sediment Transport. In: USACE. **Coastal Engineering Manual** - Chapter 2, Part III. Vicksburg, Mississippi: EM 1110-2-1100, 2002. 113p.

WINYU, R.; S. TOMOYA. Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves. **Coastal Engineering Journal**, v. 40, n. 4, p. 327-346, dec. 1998.

# APÊNDICE 1 - VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA SEDIMENTAR DOS PERFIS

Variação volumétrica (m³)					
Perfil	Atami	Marisol	Santa Terezinha	San Marino	Matinhos
<b>2006</b>	5,42	-20,96	-1,92	-3,69	-2,84
	6,81	-47,16	10,12	*	6,42
	4,49	-21,58	5,74	7,54	-0,12
	3,95	*	*	1,99	*
	*	-9,06	-0,85	*	-2,21
	-19,82	-31,75	-1,54	-5,20	0,27
	5,76	-16,63	-5,09	-6,28	-2,71
<b>Total</b>	<b>6,61</b>	<b>-147,14</b>	<b>6,46</b>	<b>-5,64</b>	<b>-1,19</b>
<b>2007</b>	*	45,99	0,35	*	1,22
	21,34	-10,39	-0,45	2,63	0,35
	-11,29	47,02	-0,37	-2,53	-0,85
	-19,02	-48,21	-2,15	-2,30	-1,00
	26,58	38,62	-3,39	-1,67	7,85
<b>Total</b>	<b>17,61</b>	<b>73,03</b>	<b>-6,01</b>	<b>-3,87</b>	<b>7,57</b>
<b>2008</b>	8,72	37,04	-3,54	0,03	-0,95
	-32,23	-34,71	-0,73	-1,73	-0,82
	*	-26,38	-10,76	-5,65	-4,37
	-6,75	-13,44	17,90	2,90	-1,40
	-0,74	13,96	-10,60	11,65	-5,68
	11,53	*	*	-7,59	5,00
<b>Total</b>	<b>-19,47</b>	<b>-23,53</b>	<b>-7,73</b>	<b>-0,39</b>	<b>-8,22</b>

FONTE: ADAPTADO DE QUADROS (2016, NO PRELO). SINAIS NEGATIVOS SIGNIFICAM RETIRADA DE SEDIMENTOS.



## APÊNDICE 2 - VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS PERFIS SIMULADOS

Variação volumétrica (m³)					
Perfil	Atami	Marisol	Sta Terezinha	San Marino	Matinhos
2006	7343,10	5534,53	22923,10	20310,39	18079,73
	-12878,09	-26322,57	-21650,95	-23502,70	-24566,43
<b>Total</b>	<b>-5534,99</b>	<b>-20788,04</b>	<b>1272,15</b>	<b>-3192,31</b>	<b>-6486,70</b>
2007	7300,08	4339,15	21894,44	17555,51	15082,57
	-12796,44	-29309,37	-19394,43	-24913,75	-28620,52
<b>Total</b>	<b>-5496,36</b>	<b>-24970,22</b>	<b>2500,01</b>	<b>-7358,24</b>	<b>-13537,95</b>
2008	8342,78	5805,57	27639,75	23334,42	22375,20
	-11991,17	-24129,44	-18390,18	-22618,23	-25444,03
<b>Total</b>	<b>-3648,39</b>	<b>-18323,87</b>	<b>9249,57</b>	<b>716,19</b>	<b>-3068,83</b>

SINAIS NEGATIVOS SIGNIFICAM RETIRADA DE SEDIMENTOS.